

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО НАВОДОРОЖИВАНИЯ НА СОСТОЯНИЕ И КОНЦЕНТРАЦИЮ ВОДОРОДА В НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Мерсон Е.Д.

Руководитель: к.ф-м.н. Виноградов А.Ю.

Тольяттинский Государственный Университет, лаборатория «Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы» г. Тольятти

Mersoned@gmail.com

В работе исследовали зависимость концентрации водорода в низкоуглеродистой горячекатаной стали S235JR в отожженном и упрочненном состояниях (после прокатки) от плотности тока электролитического наводороживания. Было установлено, что данная зависимость не линейна и имеет три характерные области. Также показано, что водород преимущественно содержится в стали в диффузионно-подвижном виде и имеет энергию активации 15,8 кДж/моль, которая соответствует водороду, находящемуся на границах зерен и дислокациях.

1. ВВЕДЕНИЕ

Водородная хрупкость (ВХ) сталей является одной из серьезных проблем современного материаловедения. Для изучения данного явления в лабораторных условиях, как правило, необходимо предварительное насыщение исследуемого металла водородом. Наиболее простым в реализации и одновременно эффективным методом является электролитическое наводороживание, при котором образец, погруженный в электролит и являющийся катодом, насыщается водородом под действием электрического тока. Варьируя плотность катодного тока наводороживания можно контролировать концентрацию водорода в образце. Однако однозначный вид зависимости содержания водорода в стали от плотности тока на сегодняшний день не установлен. В настоящей работе исследовали зависимость концентрации водорода в низкоуглеродистой стали в отожженном и упрочненном состояниях в широком диапазоне плотностей тока.

2. МЕТОДИКА

Исследования проводили на шлифованных прямоугольных образцах размером 40x5x2,5 мм, вырезанных из горячекатанного листа низкоуглеродистой нелегированной стали марки S235JR. Часть образцов отжигали в вакууме при температуре 950°C в течение 30 мин. Наводороживание образцов производили в 5% растворе H_2SO_4 + 1,5 г/л тиомочевины (стимулятор наводороживания) в течение 1 часа в диапазоне плотностей тока от 10 до 310 мА/см². Анодом служила спираль из платиновой проволоки.

Определение концентрации водорода проводили на газоанализаторе G8 Galileo (Bruker), методом экстракции в потоке газа носителя N_2 . Анализ водорода проводили путем нагрева образца до $200^\circ C$ и последующей выдержки при данной температуре в течение 10 мин.

Анализ поверхности образцов после наводороживания производили при помощи конфокального лазерного сканирующего микроскопа LextOLS4000 (Olympus).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе экспериментов было установлено, что в диапазоне от 22 до $900^\circ C$ на экстракционной кривой наблюдается только один существенный пик, которому при скорости нагрева $4^\circ C/мин$ соответствует температура $85^\circ C$. При увеличении скорости нагрева пик смещается к более высоким температурам. Энергия активации для данного пика оказалась равна $15,8$ кДж/моль, что согласно [1] соответствует водороду, находящемуся на границах зерен и дислокациях.

Зависимость концентрации водорода от плотности тока наводороживания имеет нелинейный характер, как для отожженных, так и для исходных (после прокатки) образцов (рис. 1).

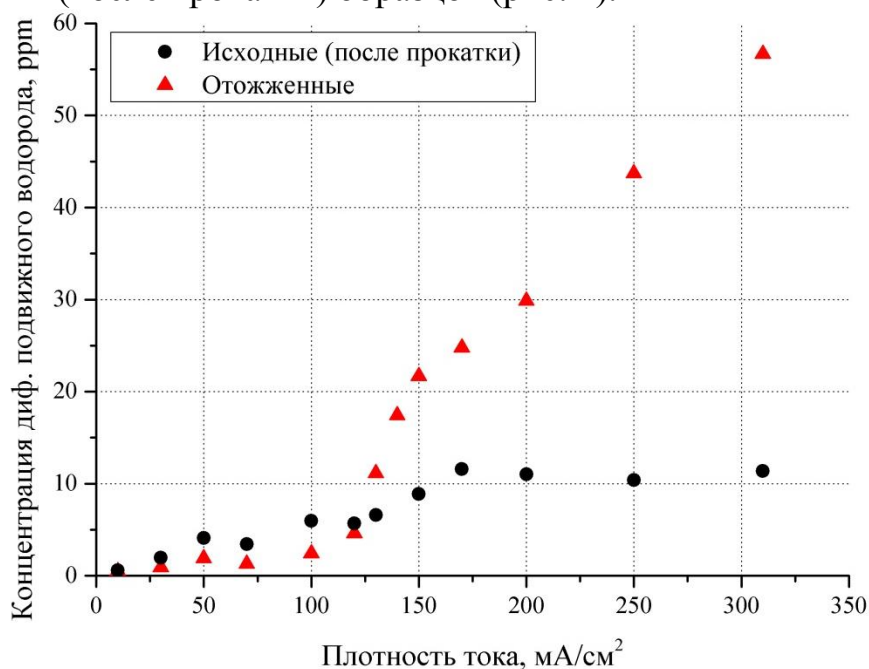


Рисунок 1 – Зависимость концентрации водорода в образцах стали S235JR от плотности тока электролитического наводороживания.

График имеет три характерные области. Первая область характеризуется монотонным возрастанием концентрации водорода с увеличением плотности тока, причем для образцов в упрочненном состоянии рост происходит несколько быстрее. Поверхность образцов на данном этапе остается практически неповрежденной, за исключением единичных небольших блистеров. По-видимому, на данном этапе рост концентрации

водорода происходит, преимущественно, за счет его сегрегации на границах зерен. При некотором критическом значении плотности тока (120 и 130 мА/см²) для отожженных и упрочненных образцов, соответственно) на графиках наблюдается резкий перегиб, соответствующий началу второй, достаточно узкой области значений плотности тока, в которой происходит резкое возрастание концентрации водорода. Для образцов в упрочненном состоянии данная область выражена гораздо слабее и смещена в сторону более высоких плотностей тока. На поверхности образцов появляется большое количество крупных блистеров (с диаметром до нескольких мм), причем для отожженных образцов они имеют характерные складки, свидетельствующие об интенсивной пластической деформации. Очевидно, на данной стадии давление водорода внутри несплошностей металла достигает критического значения, при котором начинается активная пластическая деформация окружающей матрицы. Резкое возрастание концентрации водорода можно объяснить его «оседанием» на свежих дислокациях, возникающих вблизи несплошностей и, как известно, являющихся эффективными ловушками водорода. Подтверждением такого эффекта могут также служить результаты недавно опубликованной работы [2] в которой методом нейтронной томографии показано, что вблизи водородных трещин в чистом железе существует зона глубиной ~50 мкм, обогащенная водородом. Дальнейшее увеличение плотности тока (выше 150 и 160 мА/см² для отожженных и упрочненных образцов, соответственно) приводит к снижению интенсивности роста концентрации водорода для отожженных образцов и к его полной остановке для образцов в упрочненном (после прокатки) состоянии. Вероятно, при данной плотности тока образцы в упрочненном состоянии достигают предельной деформации, поэтому концентрация водорода в них больше не возрастает, а отожженные образцы продолжают деформироваться под действием внутреннего давления водорода.

4. ВЫВОДЫ

1. Водород, содержащийся в стали после завершения электролитического наводороживания, преимущественно находится в диффузионно-подвижном состоянии на границах зерен и дислокациях и имеет энергию активации 15,8 кДж/моль.

2. Зависимость концентрации диффузионно-подвижного водорода в стали от плотности тока наводороживания не линейна и имеет два перегиба для исходных (в упрочненном состоянии) и отожженных образцов. Такой характер зависимости может быть объяснен образованием пластически деформированных зон вблизи водородных трещин и сегрегацией водорода на дислокациях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-02-31052.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Wei F., Hara T., Tsuzaki K. Precise determination of the activation energy for desorption of hydrogen in two Ti-added steels by a single thermal-desorption spectrum // Metall. Mater. Trans. B., 2004. T. 35, № 3. C. 587–597.
2. Griesche A. et al. Three-dimensional imaging of hydrogen blister in iron with neutron tomography // Acta Mater. 2014. T. 78. C. 14–22.